

半導体歪ゲージを用いたハイダイナミックレンジ1軸力覚センサの開発

田村 龍也* (埼玉大学), 境野 翔 (筑波大学, JST さきがけ), 辻 俊明 (埼玉大学)

Development of high dynamic range uniaxial force/torque sensor using semiconductor strain gauge

Ryuya Tamura (Saitama University)

Sho Sakaino (University of Tsukuba, JST/presto)

Toshiaki Tsuji (Saitama University)

Abstract

A force/torque is often required to detect small force while its maximum load is also often large. In other words, the dynamic range of force sensors should be higher. In order to extend the dynamic range of the force/torque sensor, a high dynamic range force sensor that uses both semiconductor strain gauges and general strain gauges was developed. Experimental results show that the dynamic range can be extended without complicating the structure of the strain body.

キーワード：力計測，力制御，ハプティクス

(Force sensing, Force control, Haptics Tactile sensing)

1. まえがき

ロボットの活躍領域は近年急速に拡大しており、それとともに普及率も上昇している。従来は自動車や家電など製造を行う産業用途での活躍が主であったが、現在は医療、介護やサービス業などの第三次産業に有効性が見込まれ、協働ロボット等が多く開発されていることからその背景がうかがい知れる。

協働ロボットの中でも特に人間を支援するまたは人間の代替として活動するロボットが注目されている。これらのロボットには環境適応力が求められ、環境情報の取得が必要不可欠となっている。中でも力覚情報は多様な動作の実現のためには必須だと考えられ、実際ロボットによる多くの作業で力覚センサが用いられている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

これまでの力覚センサは、発生する力の大きさに合わせて、測定に際し適切なレンジの力覚センサを選出し使用されてきた。しかし多種多様な動作を一台のロボットで実現させる場合、それに導入する力覚センサはレンジが限定的なものではなく、よりハイダイナミックレンジ(HDR:High Dynamic Range)であることが求められる。また、HDR だけでなく、ロボットに取り付け可能なサイズであることが求められる。

このような需要に対し、Jiang らは低剛性起歪体と高剛性起歪体を組み合わせた1軸⁽⁶⁾、2軸⁽⁷⁾の力情報を検知可能なHDR 力覚センサを提案した。また起歪体を用いず、水晶振動子による圧電効果を利用し HDR で力覚検知を可能にした1軸のセンサも提案されている⁽⁸⁾。

さらに1軸、2軸での検知のみであった HDR 力覚センサに対し、Okumura らは6軸の力情報を取得可能な HDR 力覚センサ (size:150 × 150 × 45 mm) を提案した⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。これはそれぞれが6軸の力情報を取得できる低剛性起歪体と高剛性起歪体を二段に重ね合わせた構造をしており、0.01N から1000N までの力覚検知が可能である。従来の10倍以上のダ

イナミックレンジを有した力覚センサとなった。

しかし、提案されてきた HDR 力覚センサはセンサ自体のサイズが大きく、先述したようなロボットに導入する上で大きな問題となる。

これに対し我々は起歪体の構造自体を工夫することで HDR と小型化の両立を図るセンサ⁽¹¹⁾の提案をした。このセンサは低剛性起歪体の形状がクロスアーチ型となっており、高剛性起歪体の隙間にフィットする構造となっている。センササイズは(80 × 80 × 23.5 mm)と小型化に成功し、測定レンジは0.2N～500Nを確保出来た。しかし、0.2N以下の低荷重域での測定が不向きであることや、従来センサのHDRの広さを保つことが出来なかった。

これらの研究ではストッパ機構を有する多段型のメカニズムを小型化すると非線形性が增大することが判明した。この課題を解決するためには単純な構造の起歪体でダイナミックレンジを拡張する方法を考える必要がある。

そこで本論文では、HDRを実現する新たな手法として、半導体ひずみゲージと金属箔ひずみゲージを併用した小型で単純な構造の力覚センサを提案する。従来は剛性の異なる起歪体を多段に使用することで実現していたHDRを、本センサでは単純な起歪体構造(片持ち梁)上に感度の異なるひずみゲージを導入することでHDRを実現した。

2. 力覚センシングの原理

力覚センサは力覚情報を測定するセンサである。力覚情報を測定するためには、被測定材料のひずみ、変化量、または素子の特性変化等を電気信号に変換する必要がある。実際、力覚センサには様々な測定方式が採用されており、ひずみゲージ式⁽¹²⁾⁽¹³⁾、静電容量式⁽¹⁴⁾、光学式⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾などが実用化されている。本研究は中でもひずみゲージ式を採用する。

材料に引張力(または圧縮力) P が加わる時、これに対応する応力 σ が材料内部に発生する。ここでこの応力に比例

した引張りひずみ（または圧縮ひずみ）が発生し、長さ L の材料は $L + \Delta L$ （または $L - \Delta L$ ）に変形する。この時の L と ΔL の割合をひずみと呼ぶ。ひずみゲージはこのひずみを電気信号として検出することのできるセンシング素子のことである。このひずみゲージは被測定対象に貼り付けて使用される。測定対象に力が加わりひずみが発生すると張り付けたひずみゲージにひずみが伝達される。この時ひずみゲージはひずみの大きさに比例して内部の抵抗体の抵抗値が変化する。これを検出し印加荷重と結び付けることで力覚情報の取得が行える。被測定対象に発生したひずみとひずみゲージの抵抗変化の関係を次式で表す。

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \dots \dots \dots (1)$$

各変数は ひずみ, R : 抵抗, ΔR : 抵抗変化, K : ゲージ率である。ここで K はゲージ率と呼ばれるもので、各ひずみゲージ固有の比例定数である。またゲージ率の大きさは感度の高さを表す指標となる。

Table 1 に本研究で使用したひずみゲージの詳細を示す。本研究で使用するひずみゲージは金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージの二種類である。使用するひずみゲージのゲージ率はそれぞれ異なる値となっており、このゲージの感度の違いを利用し、半導体ひずみゲージでは低荷重域を、金属箔ひずみゲージでは高荷重域のひずみの検出を行い、組み合わせることで HDR を実現する。

表 1 ひずみゲージ
Table. 1 Strain gauge

ひずみゲージ	材質	ゲージ率	ひずみ限界 [$\mu\text{m}/\text{m}$]
金属箔	Ni-C 系合金箔	2	20000
半導体	P 型 Si	182	3000

3. HDR1 軸力覚センサの設計

〈3・1〉 起歪体の構造 提案する力覚センサの構造とひずみゲージ貼り付け位置を Fig. 1 に、起歪体の寸法を Table 2 に示す。本研究ではセンシング部分の提案による HDR の原理的検証を目的としているため、起歪体の構造は非常に単純な片持ち梁を採用した。また、大荷重に耐えられるよう起歪体の材料は剛性の高い超々ジュラルミンを採用した。

〈3・2〉 ひずみゲージ貼り付け位置 有限要素法シミュレーションによる起歪体のひずみ分布を Fig. 2 に示す。

ひずみゲージは被測定対象のひずみが伝達することにより抵抗変化が生じるセンシング素子である。ひずみの変化は大変微小であるため、ひずみゲージの貼り付け位置は測定対象のよりひずみやすい部分に貼り付けることが求められる。よって有限要素法シミュレーションにより任意の荷重を印加、この時のひずみ分布をもとに貼り付け位置を決定した。ひずみゲージは F_z 方向の荷重を受けた時にひずみ面に表裏合わせて二枚貼り付けた。また、このシミュレーション

結果より得られた本センサの定格荷重と定格荷重印加時の安全率のパラメータを Table 3 に示す。

表 2 起歪体の寸法 [mm]
Table. 2 Dimensions of strain body [mm]

	Length	Width	Height
Cantilever beam	100	10	10

表 3 定格荷重と安全率
Table. 3 Rated load and safety factor

定格荷重 $F[\text{N}]$	安全率
200.0	1.145

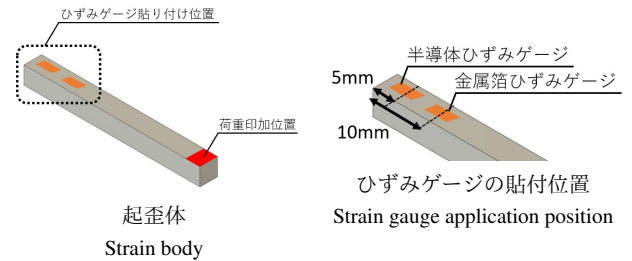


図 1 HDR1 軸力覚センサ
Fig. 1 HDR uniaxial force sensor

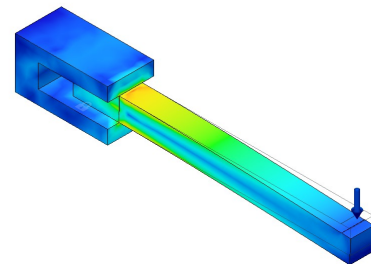


図 2 ひずみ分布
Fig. 2 Strain distribution

〈3・3〉 測定回路系の構成と計測レンジ ひずみを取得するための測定回路を Fig. 3 に示す。ひずみの変化を受けて抵抗値が変位するひずみゲージは、ホイートストンブリッジ回路に接続される。ブリッジ電圧を読み取り、A/D 変換された値がカットオフ周波数 $f_c = 10\text{Hz}$ の LPF を通って USB 接続された PC に出力されることで、ひずみの計測が行える。

ここで、金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージそれぞれの測定レンジを Fig. 4 に示す。今回使用したひずみアンプは PCD-400A で、このひずみアンプの測定レンジは最大

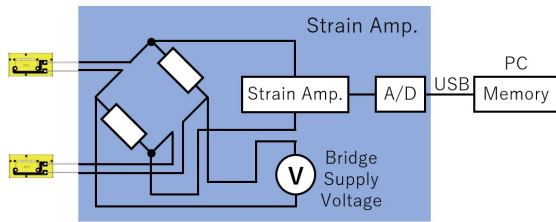


図3 測定回路
Fig. 3 Measurement circuit

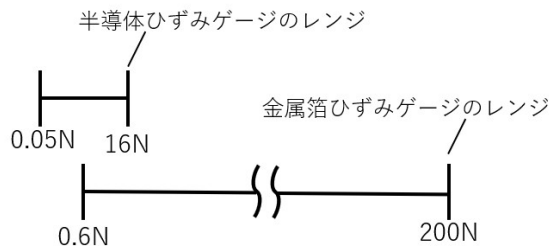


図4 各ひずみゲージの測定レンジ
Fig. 4 Measurement range of each strain gauge

20000×10^{-6} である。Table 1 に記したように金属箔、半導体ひずみゲージのひずみ限界はそれぞれ $20000, 3000 \times 10^{-6}$ であるが、出力として得られる値は、起歪体に生じたひずみのゲージ率倍されたものである。よって、金属箔ひずみゲージでは 10000×10^{-6} までのひずみを出力として得ることができ、半導体ひずみゲージでは金属箔ひずみゲージでノイズに埋もれてしまう低荷重域の値を 110×10^{-6} まで出力値として得ることができる。このひずみのレンジを印加荷重のレンジに置き換えると Fig. 4 に示したレンジとなり、ゲージ率の異なるひずみゲージを併用することで HDR を有した力覚センサを設計することが可能であると見込める。

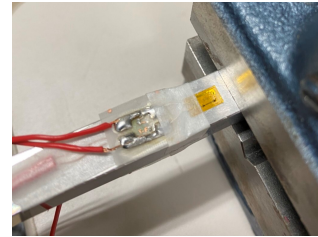
4. 性能試験

開発した HDR1 軸力覚センサの性能を評価するために荷重印加試験を行った。Fig. 1 に示す荷重印加位置に任意の荷重を印加し、その時の金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージの出力を調べた。印加荷重は $0 \sim 2.5\text{N}$ の範囲で 0.5N 刻みに印加した。

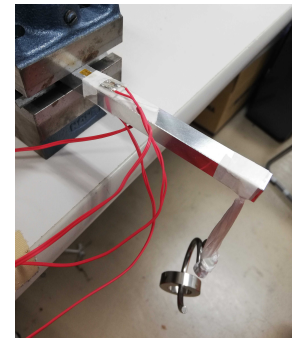
実際に製作した力覚センサと実験の様子を Fig. 5 示す。さらに、試験より得られた金属箔ひずみゲージの出力を Fig. 6、半導体ひずみゲージの出力を Fig. 7 に示す。

Fig. 6, Fig. 7 を見比べると、同じ荷重を印加している時にそれぞれ出力が異なっていることが分かる。また、半導体ひずみゲージの出力のほうが大きく得られていることから、低荷重に対し高感度に出力を得られることが確認できた。

ここで、 1N 印加時のシミュレーションによる起歪体自体のひずみ値と試験で得られた金属箔、半導体ひずみゲージの出力を比較する。まず、シミュレーションにより 1N 印加時では金属箔ひずみゲージ貼り付け位置： $6.658\mu\text{m/m}$ 、半導



製作した HDR1 軸力覚センサ
Made HDR uniaxial force sensor



実験の様子
State of experiment

図5 実際の HDR1 軸力覚センサ
Fig. 5 Actual HDR uniaxial force sensor

体ひずみゲージ貼り付け位置： $7.047\mu\text{m/m}$ という結果が得られた。さらに Fig. 6, Fig. 7 を見ると、金属箔ひずみゲージは無負荷時： -3.21μ 、 1N 印加時： 8.62μ で半導体ひずみゲージは無負荷時： 1.43μ 、 1N 印加時： 1358μ という結果が得られた。ここで取り上げた数値は印加荷重に変動の無い一定時間の出力を平均したものである。

金属箔ひずみゲージは無負荷時から 1N 印加時の間で約 11.8μ の変位がみられ、シミュレーションで得た起歪体のひずみ出力に対し、約ゲージ率倍された出力が得られた。また、 1N 印加時の出力をもとに無負荷時のノイズによる出力値を荷重変換すると、約 0.37N であった。よって金属箔ひずみゲージでは約 0.37N 以上の荷重であればノイズに埋もれることなく取得できる。

半導体ひずみゲージは無負荷時から 1N 印加時の間で約 1357μ の変位がみられる。シミュレーションで得た起歪体のひずみ出力に対し、約ゲージ率倍された出力が得られた。また、 1N 印加時の出力をもとに無負荷時のノイズによる出力値を荷重変換すると、約 0.001N であった。よって半導体ひずみゲージでは約 0.001N 以上の荷重であればノイズに埋もれることなく取得できる。

この結果より、1 つの起歪体上にゲージ率の異なるひずみゲージを張り付けることで、 0.001N から定格荷重である 200N までの力覚情報の測定が本センサで可能であることが示された。

5. まとめ

小型かつ HDR を有した力覚センサの開発を目的とし、片持ち梁の起歪体に金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージを貼り付ける構造のセンサを提案した。

本センサは半導体ひずみゲージと金属箔ひずみゲージを併用することで、 $0.001\text{N} \sim 200\text{N}$ の範囲で力の測定が可能となり、分解能は 2×10^5 と従来よりも広いレンジを確保することが出来た。よって感度の異なるひずみゲージを併用することで、起歪体の構造自体は単純でもダイナミックレンジを有した力覚センサの実現が可能であることが示された。

今後は 1 軸のみで実現した本センサを 6 軸測定が可能

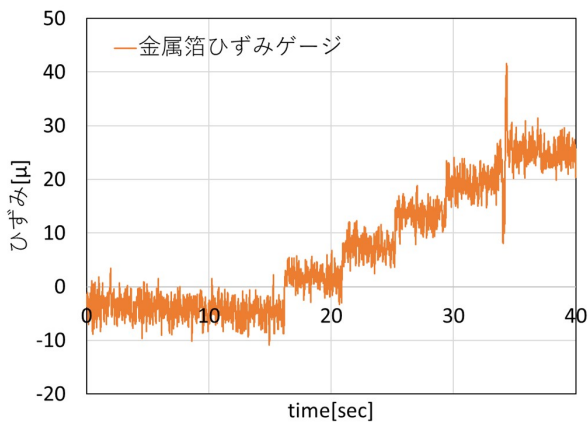


図6 金属箔ひずみゲージの出力
Fig. 6 Output of metal foil strain gauge

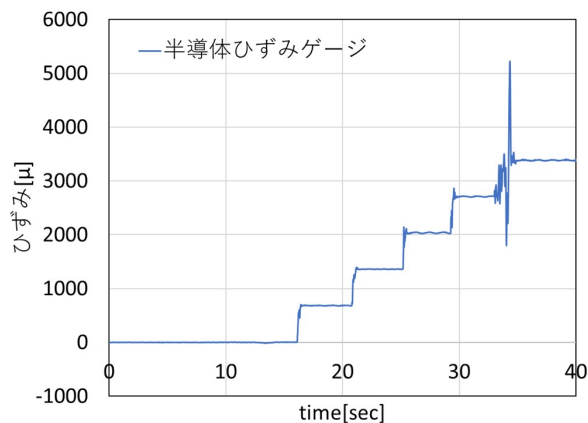


図7 半導体ひずみゲージの出力
Fig. 7 Output of semiconductor strain gauge

センサへと拡張を行う。これにより小型かつ単純な構造のHDR6軸力覚センサの開発を目指す。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものであることをここに付記し、関係者各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) S. J. Blumenkranz, G. M. Prisco, S. P. DiMaio, W. D. Gregory II, H. Dostmohamed, C. J. Hasser, and G. S. Guthart, "Force and torque sensing in a surgical robot setup arm," Google Patents, US Patent 9,895,813, 2018.
- (2) P. J. Berkelman, L. L. Whitcomb, R. H. Taylor, and P. Jensen, "A miniature microsurgical instrument tip force sensor for enhanced force feedback during robot-assisted manipulation," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2003, Vol. 19, No. 5, pp. 917–921.
- (3) K. Bouyarmane, K. Chappellet, J. Vaillant, and A. Kheddar, "Quadratic programming for multirobot and task-space force control," *IEEE Trans. on Robotics*, 2019, Vol. 35, No. 1, pp. 64–

- 77.
- (4) C. Jacq, B. L?thi, T. Maeder, O. Lamercy, R. Gassert, and P. Ryser, "Thick-film multi-DOF force/torque sensor for wrist rehabilitation," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, Vol. 162, No. 2, pp. 361–366.
- (5) T. Yokoo, M. Yamada, S. Sakaino, S. Abe, and T. Tsuji, "Development of a physical therapy robot for rehabilitation databases," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 2012, pp. 1–6.
- (6) J. Jiang, W. Chen, J. Liu, W. Chen, and J. Zhang. Design of a Dual-Range Force Sensor for Achieving High Sensitivity, Broad Bandwidth, and Large Measurement Range. *IEEE Sens. J.*, Vol. 15, No. 2, pp. 1114–1123, 2015.
- (7) J. Jiang, W. Chen, J. Liu, and W. Chen. A cost effective multi-axis force sensor for large scale measurement : design , modeling , and simulation. pp. 188–193, 2013.
- (8) Y. Murozaki, K. Nogawa, and F. Arai. Miniaturized load sensor using quartz crystal resonator constructed through microfabrication and bonding. *Robomech J.*, Vol. 1, No. 1, p. 3, 2014.
- (9) D. Okumura, S. Sakaino, and T. Tsuji. High Dynamic Range Sensing by a Multistage Six-Axis Force Sensor with Stopper Mechanism. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- (10) 辻俊明, 奥村大輔, 境野翔. 多段型ハイダイナミックレンジ6軸力覚センサの小型化. 日本ロボット学会学術講演会, 2018.
- (11) R. Tamura, S. Sakaino, and T. Tsuji. Development of compact high dynamic range six-axis force sensor with cross-arch structure. In *Proc. Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc*
- (12) K. Nishiwaki, Y. Murakami, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue. A six-axis force sensor with parallel support mechanism to measure the ground reaction force of humanoid robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Vol. 3, pp. 2277–2282, 2002.
- (13) Q. Liang, D. Zhang, Q. Song, Y. Ge, H. Cao, and Yu Ge. Design and fabrication of a six-dimensional wrist force / torque sensor based on E-type membranes compared to cross beams. *Measurement*, Vol. 43, pp. 1702–1719, 2010.
- (14) F. Beyeler, S. Muntwyler, and B. J. Nelson. A six-axis MEMS force-torque sensor with micro-Newton and nano-Newtonmeter resolution. *J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 18, No. 2, pp. 433–441, 2009.
- (15) J. C. Kim, K. S. Kim, and S. Kim. Note: A compact three-axis optical force/torque sensor using photo-interrupters. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 84, No. 12, pp. 77–80, 2013.
- (16) H. Su and G. S. Fischer. A 3-axis optical force/torque sensor for prostate needle placement in magnetic resonance imaging environments. In *Proc. IEEE Int. Conf. Technol. Pract. Robot Appl.*, pp. 5–9. IEEE, 2009.
- (17) P. Polygerinos, P. Puangmali, T. Schaeffter, R. Razavi, L. D. Seneviratne, and K. Althoefer. Novel miniature MRI-compatible fiber-optic force sensor for cardiac catheterization procedures. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2598–2603. IEEE, 2010.